

アクシオンの揺らぎのダイナミクスとその応用について



佐藤 亮介

大阪大学大学院理学研究科
rsato@het.phys.sci.osaka-u.ac.jp

現在の宇宙のエネルギーの約 1/4 は、**暗黒物質**と呼ばれる正体不明の物質で占められていることが分かっている。暗黒物質の候補の中でも、**アクシオン**は有力な候補として注目を集めている未発見の粒子である。アクシオンは素粒子物理および宇宙論の双方で重要な役割を果たすとして、様々な観点から盛んに研究されている。アクシオンの特徴の一つは周期的なポテンシャル項を持つことである。また、アクシオンは質量が小さく、アクシオンが暗黒物質である場合には現在の宇宙における数密度は大きな値となる。そのため、多数のアクシオン粒子が同じ量子状態を占め、粒子というより場（あるいは波）のような振る舞いを見せるとされている。

暗黒物質の議論には、宇宙の歴史のどの時点でどのようにしてその暗黒物質が生成されたかが重要である。この観点から、初期宇宙におけるアクシオンの場としての振る舞いを深く理解する必要がある。筆者らは、アクシオン場の初期条件が空間的にほぼ一様でも、アクシオン場の速度が大きな値を持つ場合、共鳴現象を通じてアクシオン場の空間的な揺らぎが成長することを指摘した。これは一様成分のエネルギーが揺らぎへと散逸していくことを意味する。筆者らはこの現象をアクシオン・フラグメンテーションと名付けた。この現象を通じてアクシオン場の特徴的な揺らぎのスケールが予言される。

アクシオン・フラグメンテーションの重要な応用例の一つが、**電弱理論**のエネルギースケールを説明するメカニズムの候補

とされている**リラクシオン**のシナリオである。リラクシオンはアクシオンの一種であり、初期宇宙でリラクシオンが速度を持つことによって電弱理論のエネルギースケールをスキャンするように時間発展する。リラクシオンがやがて停止するためには何らかの摩擦を与える効果が必要であるが、筆者らはフラグメンテーションの効果が摩擦として働くことを指摘した。この議論により、いままで見逃されていたシナリオの可能性を議論できるようになった。

また、暗黒物質の生成メカニズムとして近年注目を集めている、**キネティック・ミスアラインメント・メカニズム**もフラグメンテーションの重要な応用例である。このメカニズムでは、初期宇宙におけるアクシオン場 $\phi(t, \mathbf{x})$ は、 $\phi(t, \mathbf{x}) \simeq \bar{\phi}(t)$ というように空間的にほとんど一様な値をとりながら、大きな速度 $\dot{\phi}$ を持つという初期条件が与えられる。筆者らはこのシナリオでフラグメンテーションが起こり得ることを指摘した。特徴的な波数を持つアクシオン揺らぎが生成されるため、アクシオン・ミニクラーターや重力波などの観測可能なシグナルが生成される可能性も指摘されており興味深い。

アクシオン・フラグメンテーションは周期的なポテンシャル項と十分大きな速度さえあれば起こる現象であるため、様々な素粒子モデルへの応用が期待できる。ここまでで述べたものの他にも興味深い応用例が存在する可能性があり、今後の研究の進展が期待される。

用語解説

暗黒物質：

現在の宇宙の約 1/4 を占めるとされる正体不明の物質。通常の物質と相互作用が非常に弱く、宇宙年齢と比較して十分安定である、とされている。

アクシオン：

対称性の自発的破れに伴ってあらわれる南部ゴールドストーン粒子の一種。ゲージ場と特徴的な相互作用項を持つ。暗黒物質の候補としても有力視されている。

電弱理論：

電磁相互作用と弱い相互作用に関する素粒子理論。ワインバーグ-サラム理論などとも呼ばれる。

リラクシオン：

電弱スケールの大きさを説明するためのシナリオの一つ。アクシオンの一種であるリラクシオン (relaxion) がヒッグス場の質量項を動的にコントロールすることにより電弱スケールを説明する。

キネティック・ミスアラインメント・メカニズム：

アクシオン暗黒物質の生成メカニズムの一つ。初期宇宙においてアクシオン場の値は大きな速度を持っており、のちに速度が小さくなってから振動をはじめるというシナリオ。